

夏巨湛 丁永祥 胡国安 编著

闭式模锻

机械工业出版社

闭式模锻

几

TC316.3

士

闭式模锻

夏巨谌 丁永祥 胡国安 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

内 容 简 介

全书共分七章,主要介绍了闭式模锻的特点及发展概况、变形过程及变形力的计算、工艺及模具设计、闭式模锻实例、闭式模锻时的润滑、锻模材料及热处理和闭式模锻设备等内容。

本书可供锻压专业的科技人员及大专院校师生参考。

闭 式 模 锻

夏巨谟 丁永祥 胡国安 编著

责任编辑:李骏带 责任校对:董薇

封面设计:刘代 版式设计:冉晓华

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $17^{1/2}$ · 字数427千字

1993年9月北京第1版·1993年9月北京第1次印刷

印数 0 001—1 500 · 定价:22.00元

*

ISBN 7-111-03448-1/TG·756

前 言

本书系统地论述了闭式模锻的金属变形过程及变形力的计算、闭式模锻工艺及模具设计。其中，对于锻件的分类、表示锻件形状复杂程度的参数、锻件工艺性分析、多向模锻工艺特点及常见多向模锻工艺方案，中间毛坯与原始毛坯形状及尺寸的确定，多余金属的溢流排出过程及分流减压腔的设计、可分凹模的设计要点等方面都提出了许多新见解，此外，通过丰富的实例介绍了各种类型锻件的闭式模锻工艺和一些典型的模具结构。这些构成了本书的体系和特点。

全书共分七章，第一章比较详细地说明了闭式模锻的特点及发展概况，第二章至第七章则是按照闭式模锻工艺的自然顺序阐述了闭式模锻的基本理论及计算公式、工艺及模具设计、润滑、模具材料及热处理和闭式模锻设备。闭式模锻实例作为第四章紧接第三章闭式模锻工艺及模具设计，以保持思维的连贯性。

本书比较广泛而系统地收集和分析了国内外有关文献资料，是在结合作者实际从事普通模锻、精密模锻、闭式模锻、温挤压和热挤压工艺研究与应用的经验和体会的基础上编著而成的。编著此书的目的在于把闭式模锻这种先进的体积成形工艺较快地推广到正在迅速发展的汽车制造、机械制造及农机制造行业中去，以便充分发挥其潜在的技术经济效益。本书可供从事锻压生产与研究工作的技术人员、科研人员及大专院校的师生参考。

本书作者是华中理工大学夏巨谌、丁永祥（与夏巨谌合写第二章）、胡国安（与夏巨谌合写第四章）。

本书由夏巨谌主编。由肖景容教授主审，黄遵循副教授对本书提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

鉴于作者经验不足，水平有限，编写这样一本新著，难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 闭式模锻的特点及发展概况	F
第二章 闭式模锻的变形过程及变形力的计算	5
一、锻件的分类	5
二、表示锻件形状复杂程度的参数	7
(一) 圆柱形锻件体积与其外接圆柱体体积之比 C_V	7
(二) 回转体锻件的轴向断面周边平方与其断面面积之比 C_A	7
(三) 回转体锻件的形状复杂系数	7
(四) 枝叉类锻件的成形系数	8
三、闭式模锻的变形过程	10
(一) 墩粗式闭式模锻的变形过程	10
(二) 闭式墩粗时金属充满模膛角隙过程的分析	11
(三) 挤压式闭式模锻的变形过程	19
(四) 回转体类零件挤压时金属的强烈流动区和自由表面形状的变化	19
(五) 侧向挤压模锻	23
四、几种主要因素对闭式模锻力的影响	25
(一) 锻件圆角半径的影响	25
(二) 接触摩擦的影响	27
(三) 锻件形状的影响	27
五、模锻变形力的计算	29
(一) 圆柱体闭式墩粗力的计算	29
(二) 圆环闭式墩粗力的计算	30
(三) 闭式模锻力的一般计算公式	33
(四) 异形件闭式模锻变形力的计算	33
(五) 带法兰锻件闭式模锻力的计算	39
(六) 杯形件闭式反挤力的计算	41
(七) 带背压作用的闭式模锻力的计算	42
(八) 利用分块法计算闭式模锻力	43
第三章 闭式模锻工艺及模具设计	47
一、概述	47
二、影响闭式模锻件尺寸的主要因素	47
(一) 坯料体积的波动	47
(二) 模膛的尺寸精度和磨损	52
(三) 模具温度和锻件温度的波动	53
(四) 零件结构的工艺性	54
(五) 锻件高度尺寸的变化同各种影响因素的关系	55
三、闭式模锻工艺的制订	52

(一) 锻件的工艺性分析.....	57
(二) 闭式模锻工艺过程的制订.....	58
(三) 锻件图的制订.....	58
四、多向闭式模锻	72
(一) 多向闭式模锻工艺的特点.....	72
(二) 多向模锻件的分组及常见的多向模锻工艺方案.....	78
五、模锻工序、毛坯及工艺参数的确定	79
(一) 模锻工序、中间毛坯与原始毛坯形状及尺寸的确定.....	79
(二) 闭式冲孔和镦粗过程的最佳参数.....	81
六、闭式模锻时多余金属的排出形式及过程	84
七、坯料和锻件的清理	95
八、锻件的冷却和防氧化	97
九、模具设计	97
(一) 模具设计过程及内容.....	97
(二) 模具的类型.....	97
(三) 多余金属分流器的设计.....	97
(四) 可分凹模模具设计要点.....	110
(五) 模膛设计中的一般问题.....	110
(六) 凹模的结构型式和尺寸.....	111
(七) 凹模强度的有限元计算.....	114
(八) 凸模尺寸和强度计算.....	119
(九) 模具的导向装置.....	119
(十) 模具的顶出装置.....	121
第四章 闭式模锻实例.....	124
一、圆盘类锻件的闭式模锻	124
(一) 锤上闭式模锻.....	124
(二) 螺旋压力机上闭式模锻.....	131
(三) 机械压力机上闭式模锻.....	136
(四) 自动热锻机上闭式模锻.....	168
二、长轴类锻件闭式模锻	170
(一) 轴线与锻击方向平行的长轴类锻件的闭式模锻.....	170
(二) 轴线与锻击方向垂直的长轴类锻件的闭式模锻.....	174
三、杯筒类锻件的闭式模锻	181
四、复杂轴对称锻件的闭式模锻	187
五、枝芽类锻件的闭式模锻	189
(一) 工艺分析.....	189
(二) 枝芽类锻件的可分凹模模锻.....	189
六、叉形件闭式模锻	208
七、多孔复杂锻件的闭式模锻	213
八、高速锤上闭式模锻	217
第五章 闭式模锻时的润滑	226
一、概述	226
二、闭式模锻用的润滑剂	228

三、润滑剂使用时的注意事项及效果	233
第六章 锻模材料及热处理	235
一、锻模材料	235
二、锻模材料的选用	242
三、锻模的失效、堆焊及表面强化处理	246
第七章 闭式模锻设备	250
一、闭式模锻设备的类型及通用闭式模锻设备的力能特性	250
(一) 闭式模锻设备的类型	250
(二) 几种通用闭式模锻设备的力能特性	250
二、几种通用闭式模锻设备的主要技术参数和吨位选择	254
(一) 几种通用闭式模锻设备的主要技术参数	254
(二) 吨位选择	256
三、双动压力机	258
(一) 双动曲柄压力机的结构及工作原理	258
(二) 双动压力机的主要技术性能参数及吨位选择	259
(三) 双动曲柄压力机用可分凹模的典型结构	261
四、多向模锻压力机	262
(一) 多向模锻液压机	262
(二) 多向模锻机械压力机	264
(三) 国内外多向模锻压力机的研制与应用	266
(四) 多向模锻压力机的吨位选择	271
五、各类闭式模锻设备的特点和适用范围	271
(一) 机械压力机的特点和适用范围	271
(二) 螺旋压力机的特点和适用范围	271
(三) 锤类模锻设备的特点和适用范围	272
(四) 双动曲柄压力机的特点和适用范围	272
(五) 多向模锻压力机的特点和适用范围	272
参考文献	273

第一章 闭式模锻的特点及发展概况

开式模锻(图1-1a)时锻件沿分模面周围形成横向飞边,闭式模锻(图1-1b)时不形成横向飞边。

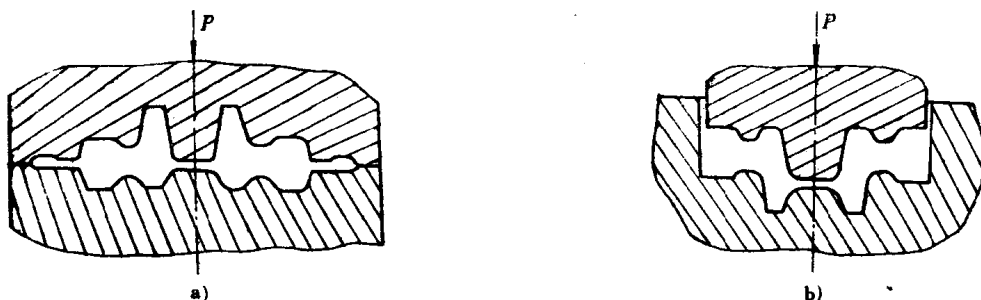


图1-1 开式模锻与闭式模锻简图

a) 开式模锻 b) 闭式模锻

闭式模锻亦称无飞边模锻,模锻时坯料金属在封闭的模膛中成形。因此,闭式模锻可以使得锻件的几何形状、尺寸精度和表面质量最大限度地接近于产品零件的几何形状、尺寸精度和表面质量。同开式模锻相比,闭式模锻可大大提高金属材料的利用率和锻件精度。

同其他体积成形工艺一样,闭式模锻可以在冷态、温态或热态下进行。在冷态闭式模锻时,金属充满模膛困难,模膛中的单位流动压力很大,对锻模寿命有消极的影响;在热态下闭式模锻,当存在氧化皮时,增大了工件与模具接触面上的摩擦,对金属充满模膛和模具寿命也不利;在温态下闭式模锻,既可降低金属材料的变形抗力,又不会产生明显的氧化皮,因此,对于一些形状简单的小型锻件,比较适合于采用温态闭式模锻。然而,对于形状复杂的锻件,采用温态闭式模锻时金属流动仍很困难。

过去,在推广应用闭式模锻工艺的过程中存在如下问题:

- (1) 当毛坯体积大于锻件体积时多余金属被分流的问题;
- (2) 模锻时模具负载繁重导致模具寿命低;
- (3) 缺少合适的闭式模锻设备。

除一些小型精密锻件用冷拔钢材作原毛坯外,一般生产中多用热轧棒料作为闭式模锻的原毛坯。而一般热轧棒料横截面偏差的平均值为5%~7.5%,还须考虑坯料加热时的氧化烧损量(1.5%~2.0%)。因此,即使采用精密下料也很难满足无飞边闭式模锻对原毛坯高精度的要求。若严格满足无飞边闭式模锻对原毛坯体积的要求,必然导致下料难度的增加,甚至不能实现。

70年代初,闭式模锻广泛应用于轴对称锻件,因为轴对称件闭式模锻时,可在凸凹模的环形间隙中容纳多余金属而形成不大的纵向飞边。在锤类设备上进行轴对称件闭式模锻时,为了确定最小坯料体积,保证充满模膛,可按如下条件下料:

$$V_b = V_{f, \max} + V_{s, \max}$$

式中 V_0 ——坯料体积;
 $V_{f, \max}$ ——模膛磨损至最大时的锻件体积;
 $V_{s, \max}$ ——坯料加热时最大烧损值。

按上述条件得到的坯料体积, 如果模锻是在新的模膛中进行, 且坯料径向尺寸为上偏差时, 则所得锻件沿高度方向的尺寸会明显地增大。这可在后续切削加工中解决。

在模锻锤上进行闭式模锻, 其成效在很大程度上取决于坯料在模膛中精确定位的可能性。在开式模锻中, 坯料在模膛中定位不准确, 甚至明显地偏移都不会影响模膛充满或影响很小, 这是因为依靠形成宽度不均匀的飞边来得以补偿。在闭式模锻中, 不精确的坯料定位会导至模膛中金属流动不均匀, 甚至导至金属挤入分模面而形成端部纵向飞边, 进而引起凸模相对于凹模歪斜, 妨碍锻模的闭合。模膛不同部分的不均匀充满导至锻件局部充不满而报废。经验表明, 当形成了局部的端部飞边, 依靠强制的辅助冲击来使金属充满模膛时, 会导至锻模的强烈磨损甚至损坏, 楔入凸凹模间隙中的端部飞边是降低锻模寿命的主要原因之一。通常锤用闭式锻模的寿命只有开式锻模寿命的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ 。如模锻同样的齿轮锻件, 采用闭式模锻时, 锻模寿命一般为3500~4000件, 而开式模锻的锻模寿命为10000~12000件。

A. З. Журавлев研究了在不同设备上进行的闭式模锻的可能性后指出, 闭式模锻能够在坯料体积波动的条件下进行, 依靠压力机—锻模系统的弹性变形来适应锻件高度尺寸的变化。对于锤上模锻, 为了利用这一条件, 在设计模具时, 必须选用足够大的承击面。然而, 这必须保证设备在超载的条件下安全可靠地工作。由于无飞边闭式模锻大大地降低了模具寿命, 同时受到设备使用的严格限制, 因此, 闭式模锻工艺未能广泛地推广应用。

为了真正广泛地推广应用闭式模锻工艺, 发展了一种小损耗即小飞边模锻工艺, 也称半闭式模锻工艺, 它是无飞边闭式模锻工艺的完善和发展。采用这种工艺有着显著的技术经济效益。经验表明, 实现半闭式模锻工艺, 采用热模锻压力机比锤类设备更合理。在热模锻压力机上实现半闭式模锻工艺的模具, 有两种基本的结构型式: 一种是具有分流腔的结构; 另一种是具有反压装置的结构。

对于第一种模具结构, 其模锻工艺过程类似于普通开式模锻, 因为挤入分流腔的多余金属类似于飞边的作用。对于第二种模具结构, 在模锻工艺过程中, 多余金属反映在锻件高度尺寸的变化上, 这同前面所述的利用设备—模具系统的弹性变形来容纳坯料上多余金属的原理完全相同, 但这种工艺方案不会导至设备超载。

闭式模锻过程中, 多余金属的流出方式, 有正挤、反挤和复合挤压三种, 选择恰当的挤出方式, 对于小飞边闭式模锻时金属充满模膛有着特别的意义。

可分凹模模锻是实现复杂锻件闭式模锻的技术进步, 80年代初开始推广应用, 现已在模锻生产中得到越来越广泛地采用。这种方法就是把置于工作筒(料仓)内的坯料金属挤入到与其相连的枝芽模膛中, 模膛垂直于工作筒直线其横截面积比工作筒的横截面积大(图4-110)。为了将模锻后的锻件从模膛中取出, 凹模设计成可分式的, 由两块或多块成组。在大多数情况下由两块组成。在模锻变形过程中两块凹模应紧密闭合, 以防止变形金属流入可分凹模的分模面。可分凹模模锻有多种不同形式, 可以通过不同的设备和模具的组合来实现。

可分凹模模锻工艺同样可在冷、温和热态时进行, 以热态应用最广。用于可分凹模模锻的材料有碳素钢、合金钢、有色金属及其合金。

利用可分凹模模锻可以获得形状复杂和相对尺寸变化大的锻件，如法兰、壳体、分枝和带叉形的、有筋的和加长形的等等。这些锻件中形状最简单的锻件的一般特征是：由两部分组成，主体为实心或空心圆柱体或棱柱体，周边为法兰、凸台、枝芽或筋。复杂锻件是由中心部分和与其相连的若干简单部分组成。杠杆和连杆类的长形锻件可算作这类锻件的典型例子。

可分凹模模锻主要用来代替在生产中广泛应用的开式模锻。因此，在研究可分凹模模锻的效果时，应将此种方法的技术经济指标与开式模锻相应指标加以比较：

(1) 金属材料利用率高 可分凹模模锻不产生飞边，模锻斜度仅 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ，甚至无斜度，可以锻出垂直于锻击方向的凹坑。这些优点能使金属材料利用率从25%~70%提高到50%~85%以上，也就是说由有飞边模锻变为可分凹模模锻，每生产1t锻件能节约金属材料0.25t以上。表1-1为采用有飞边模锻和可分凹模模锻（即小飞边模锻）生产十字轴和万向节叉时的对比情况。

表1-1 十字轴、万向轴叉采用有飞边模锻和可分凹模模锻的情况对比

锻件名称及编号		锤上有飞边模锻				压力机上可分凹模模锻				每件节省金属材料的量	
		锻件质量 kg	坯料质量 kg	名义消耗 kg	材料利用率 %	锻件质量 kg	坯料质量 kg	名义消耗 kg	材料利用率 %	kg	%
十字轴	1	0.294	0.41	0.42	70	0.295	0.315	0.32	92	0.1	24
	2	0.7	0.908	0.924	75	0.69	0.71	0.72	96	0.2	22
	3	1.2	1.65	1.75	69	1.17	1.24	1.27	91	0.18	27
	4	2.2	2.9	3.2	69	2.2	2.27	2.32	95	0.98	30
万向节叉	1	1.32	1.77	1.835	72	1.32	1.47	1.54	86	0.29	15
	2	2.3	2.99	3.165	72.5	2.3	2.56	2.68	86	0.48	15
	3	4.2	5.5	6.341	66	4.2	4.7	5.3	79	1.04	16.5
	4	7.3	9.1	9.9	74	7.3	7.85	8.1	90	1.8	18

在模锻件中，饼盘类、长轴类和枝芽类约占50%。饼盘类中质量在2~3kg以内均可采用无飞边或小飞边闭式模锻，其产量约为所有饼盘类锻件产量的40%~50%；长轴类中的小型阶梯轴以至小型连杆均可采用单冲头可分凹模模锻；枝叉类中质量在2~3kg以内的锻件可采用单冲头或多冲头可分凹模模锻，其产量约占这类锻件产量的25%~30%；此外，还有一些类型的锻件可采用无飞边或小飞边闭式模锻。据估计，可采用无飞边或小飞边模锻的锻件可达整个锻件产量的30%以上。小型汽车用的锻件可采用且要求采用闭式精密模锻生产的超过其所需锻件的50%。随着国产小汽车和引进小汽车用锻件的国产化，闭式模锻工艺节省金属材料的优越性将得到更加充分的发挥。

(2) 提高劳动生产率 采用可分凹模模锻，常常可减少甚至取消模锻制坯工序，可使模锻工步数由2~4个减少到1~2个，此外还可省去切边工序和一些辅助工序，生产率平均可提高25%~50%，由于减少了制坯工步，省去了切边工序和辅助工序，并能保证坯料在模膛内良好的定位，因而比较容易实现模锻生产自动化。

(3) 提高锻件质量 闭式模锻能使锻件与成品零件的形状非常接近或完全一致，使金属纤维沿零件轮廓分布，变形金属处于三向压应力状态，有利于提高金属材料的塑性，能够防

止零件内部出现疏松，因此产品机械性能较一般开式模锻件可提高25%以上；此外，由于无飞边，不会因切边而形成纤维外露，这对应力腐蚀敏感的材料和零件抗腐蚀气氛是有利的。

(4) 模具寿命的比较 对于一些小型锻件，无论是整体凹模 闭式模锻（形状简单的锻件），还是可分凹模闭式模锻（形状复杂的锻件），因模锻时模具吸热与散热基本平衡，模具寿命高于或至少相当于开式锻模的寿命。可分凹模模锻结构钢锻件时，模具寿命为3000~15000件，模锻黄铜锻件时其寿命可达10万件以上，对于一些中型和大型锻件，闭式模锻时模具升温快，磨损也快，因此模具寿命一般低于开式锻模的寿命。随着适合于热挤压模具钢的出现，闭式锻模的寿命正在迅速提高。

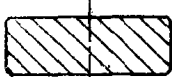
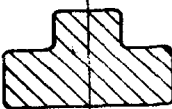
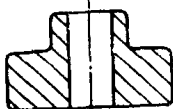
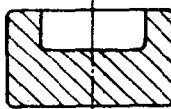
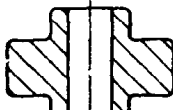
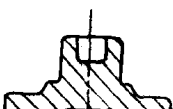
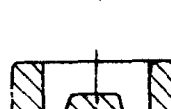
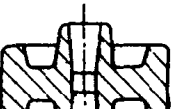
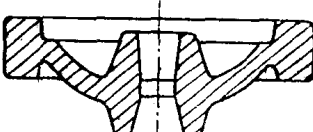
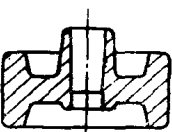
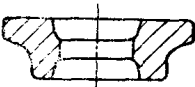
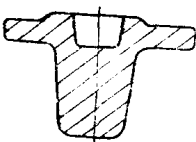
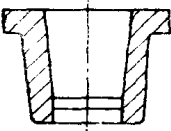
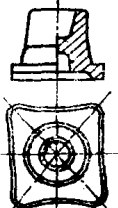
当前，可分凹模模锻主要沿两条技术路线发展。一是由通用模架和可更换的凸、凹模镶块构成可分凹模组合结构，安装在通用锻压设备如热模锻压力机或普通曲柄压力机、液压机和螺旋压力机上使用，实现一些小型锻件的可分凹模模锻；二是采用专用设备，如机械式、液压式或机械—液压联合式的多向模锻压力机，实现各种复杂锻件的多向模锻。

第二章 闭式模锻的变形过程及变形力的计算

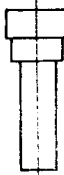
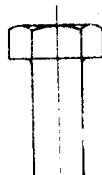
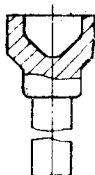
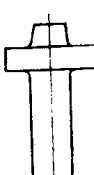
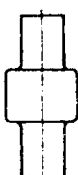
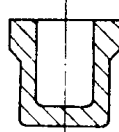
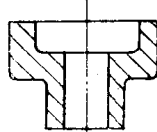
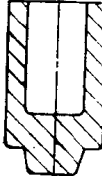
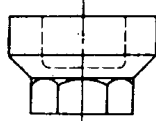
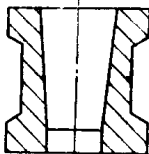
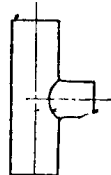
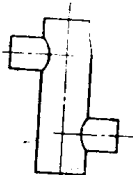
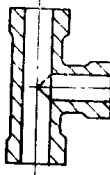
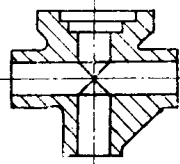
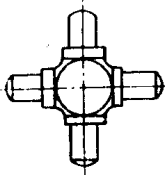
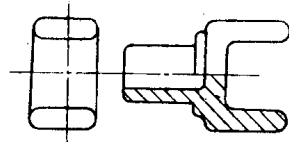
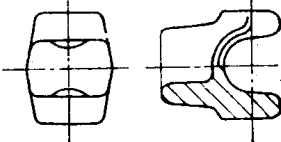
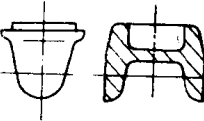
一、锻件的分类

锻件种类繁多，其几何形状的复杂程度和相对尺寸的差别很大。为了制订模锻工艺、确定合理的毛坯形状和尺寸，首先应将锻件分类。无疑，形状相似的锻件，其闭式模锻工艺及模具的结构基本相同。因此，目前比较一致的分类方法是按照锻件形状并参考模锻时毛坯的轴线方向来分类的，闭式模锻锻件的分类情况如表2-1所示。

表2-1 闭式模锻锻件的分类

分类及号	1	2	3	4	5
1 饼 盘 类	 111	 112	 113	 114	 115
		 122	 123	 124	 125
		 132	 133	 134	 135
			 144		 145
2 法 兰 类	 211	 212	 213	 214	 215

(续)

分类及号	1	2	3	4	5
3 台阶轴类	 311	 312	 313	 314	 315
4 杯筒类	 411	 412	 413	 414	 415
5 枝芽类	 511	 512	 513	 514	 515
6 叉形类	 611	 612	 613		

第一类 饼盘类锻件。其外形为圆形而高度较小。闭式模锻时毛坯轴线方向与模锻设备的作用力方向相同，金属沿高度和径向同时流动。对于结构简单的饼盘类锻件，一般只需一个终锻工步即可；对于结构复杂的，如编号为135、144和145所示齿轮坯锻件，若在热模锻压力机上闭式模锻，在终锻工步前通常还需锻粗制坯和预锻工步。

第二类 法兰突缘类锻件。其外形为回转体，带有圆形或长宽尺寸相差不大的法兰或突缘。闭式模锻时，一般只需一个终锻工步。

第三类 阶梯轴类锻件。其杆部为圆形，带有圆形或非圆形头部、或中间局部粗大的直长杆类。这类锻件中，对于编号为313所示的杯杆形阶梯轴可采用闭式锻粗与反挤复合成形工艺；其余的阶梯轴类锻件一般都采用闭式局部锻粗成形。

第四类 杯筒类锻件。这类锻件多采用闭式反挤、正反复合挤压或锻粗冲孔复合成形。

第五类 枝芽类锻件。包括单枝芽、多枝芽的实心 and 空心类锻件。这类锻件多采用可分凹模模锻或多向模锻。

第六类 叉形类锻件。包括带有空心或实心杆部、带有圆形或非圆形法兰等多种结构形

式。这类锻件常常需要两个工步以上的可分凹模模锻，即预成形和终锻。

从表2-1所示六种类型锻件的外形特点可以看出，前四类，即饼盘类、法兰突缘类、阶梯轴类和杯筒类属于旋转体；后两类，即枝芽类和叉形类属于非旋转体。

二、表示锻件形状复杂程度的参数

锻件形状对模锻时金属流动和变形力有很大影响，因此，必须找出表示锻件形状复杂程度的参数来表示。对于闭式模锻件而言，现有资料在研究锻件分类及制订工艺规范时曾使用如下几种参数来评价锻件形状的复杂程度。

(一) 圆柱形锻件体积与其外接圆柱体体积之比 C_v

如图2-1所示，实线为圆柱形锻件，虚线为外接圆柱体，两者的体积之比为：

$$C_v = \frac{4V_c}{\pi D^2 H} \quad (2-1)$$

式中 V_c ——锻件体积。

由图可知， C_v 值越大，形状越简单。通常将其分为四级：简单的， $C_v = 0.63 \sim 1$ ；一般的， $C_v = 0.32 \sim 0.63$ ；较复杂的， $C_v = 0.16 \sim 0.32$ ；复杂的， $C_v \leq 0.16$ 。

(二) 回转体锻件的轴向断面周边平方与其断面面积之比 C_A

设图2-2所示为回转体锻件的轴向断面周边长为 L ，断面面积为 F ，则其形状复杂程度为：

$$C_A = L^2 / F \quad (2-2)$$

一般说来， C_A 值越大，锻件形状越复杂，模锻时需转移的金属量越大。

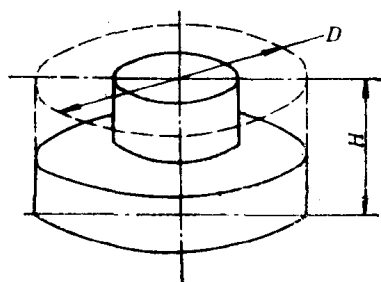


图2-1 圆柱形锻件及其外接圆柱体

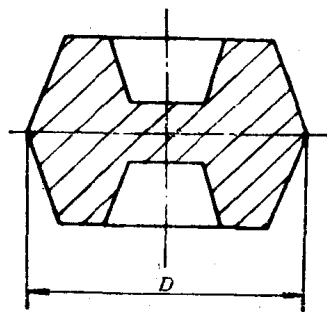


图2-2 回转体锻件

(三) 回转体锻件的形状复杂系数

Г.П捷捷林等在研究飞边槽尺寸设计时，提出了回转体锻件的形状复杂系数 C_r ，即用 C_r 值的大小来作为锻件形状复杂程度的判据，其表达式为：

$$C_r = \alpha \cdot \beta \quad (2-3)$$

式中 α 、 β ——锻件纵、横截面形状复杂系数。

纵截面形状系数：

$$\alpha = \frac{C_A}{C_r} \quad (2-4)$$

式中 C_A 与式(2-2)相同；

$C_s = \frac{L_o^2}{F_c}$ 。其中, L_o 为锻件外接圆柱体的纵截面周边长度; F_c 为锻件外接圆柱体的纵截面面积。

横截面形状系数:

$$\beta = \frac{2R_g}{R_c} \quad (2-5)$$

式中 R_g ——对称轴至半个纵截面的质心间的径向距离;

R_c ——锻件外接圆柱体的半径。

由式 (2-4) 可以看出, 在锻件外接圆柱体的高度和直径不变的条件下, 空腔愈多、愈窄和愈深, 则锻件的周长愈长、纵截面面积愈小, 相应地 L_o^2/F 值愈大。这个比值没有完全考虑空腔在锻模上的位置: 对于具有相同宽度和深度的空腔, 但它们位于轴线附近或者位于外围, 其 L_o^2/F 值是相同的, 然而, 根据实验结果, 中心空腔比外围空腔能更好、更易充满。式 (2-5) 的 β 值考虑了空腔在锻模中的分布。对于圆柱形锻件 (图 2-3a), $\frac{2R_g}{R_c} = 1$; 对于带有法兰的锻件 (图 2-3b), 其 β 值比无法兰的类似锻件 (图 2-3c) 要小。这是因为法兰在某种程度上起到了飞边的作用, 有利于锻件充满, 因而其复杂程度要小一些。

由此可见, 形状复杂系数反映了回转体锻件纵截面相对于锻件外接圆柱体纵截面的复杂程度。

图 2-4 所示为一些常见回转体锻件及其计算出的形状复杂系数 $C_s^{(1)}$ 。

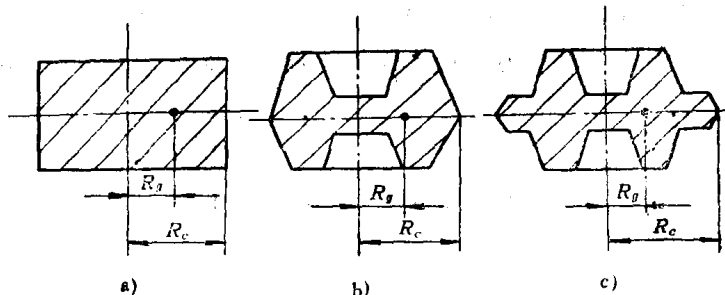


图2-3 空腔在模内的位置

a) $2R_g/R_c = 1$ b) $2R_g/R_c = 1.29$ c) $2R_g/R_c = 0.88$

不难想像, 在其他条件相同的情况下, 锻件形状复杂系数的大小, 可反映其锻件在模锻成形时金属充满模膛的难易程度和所需变形力的大小等主要工艺性能。

(四) 枝叉类锻件的成形系数

对于枝芽类和叉形类锻件, 不可能提出类似于回转体锻件那样的形状复杂系数来表示几何形状的复杂程度对其工艺性能上的难易程度的影响。根据能反映在闭式模锻时, 变形金属在模膛内流动充满时的难易程度和所需变形力或功的大小等主要工艺性能, 我们可以提出用锻件的成形系数来表示:

$$\lambda = F_o / \Sigma F_s \quad (2-6)$$

式中 F_o ——工作筒 (原毛坯) 横截面面积 (图 2-5);

ΣF_s ——枝芽模膛横截面面积之和 (图 2-5)。

图 2-5 所示为十字轴径向挤压模锻时, 变形金属作用于冲头上的单位压力 K , 同侧向枝芽的个数 z 及尺寸比 $\frac{d}{D}$ 间的关系曲线。枝芽的个数 z 和尺寸比 $\frac{d}{D}$ 两者综合在一起, 实质上代表了比值 $F_o / \Sigma F_s$ 。由图可以看出, 从左到右, 随比值 $F_o / \Sigma F_s$ 不断减小, 由冲头所施加的单位变形力逐渐降低。这是因为模膛侧枝通道越多, 金属材料被挤出形成侧向枝芽的阻力越小。

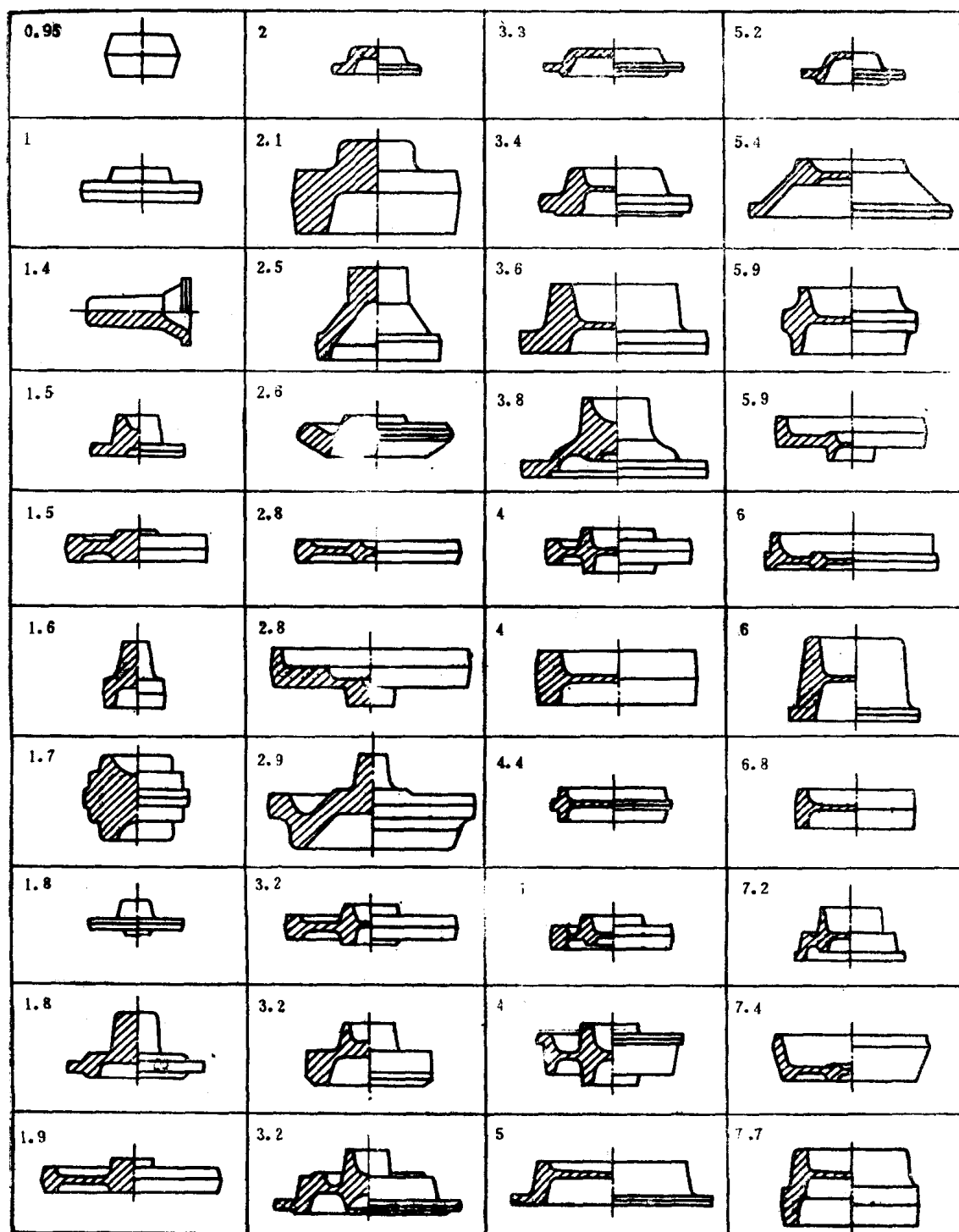


图2-4 部分锻件及其复杂性示例

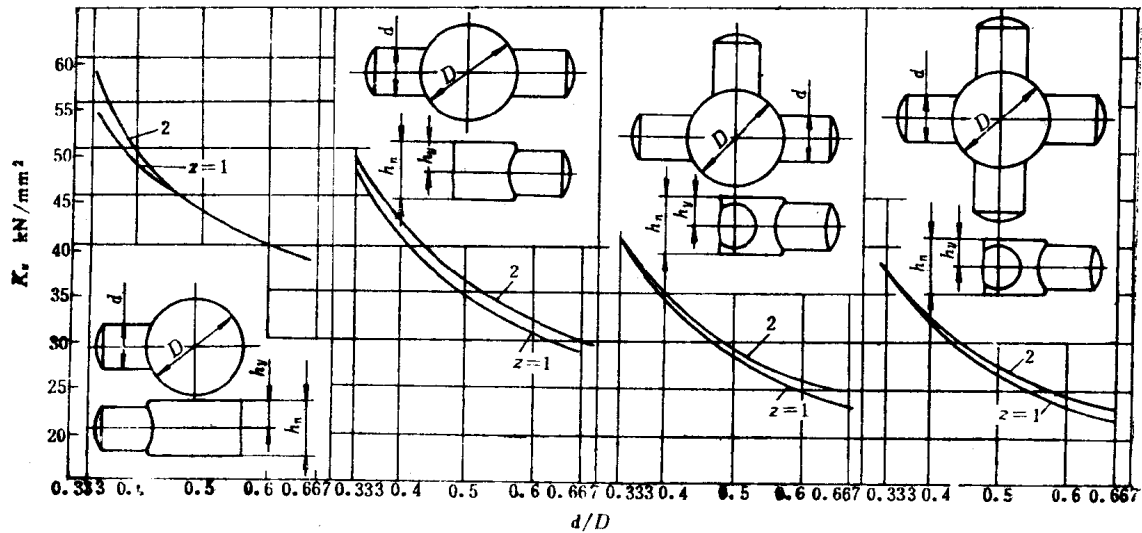


图2-5 单位压力 K_u 与 $\frac{d}{D}$ 的关系曲线

三、闭式模锻的变形过程

闭式模锻按变形金属充满模膛的方式可分为锻粗式和挤压式两类。

(一) 锻粗式闭式模锻的变形过程

锻粗式闭式模锻也称闭式锻粗，其变形过程可以分为三个阶段（如图2-6所示）：开式锻粗阶段；充满角隙阶段；挤出端部飞边阶段。

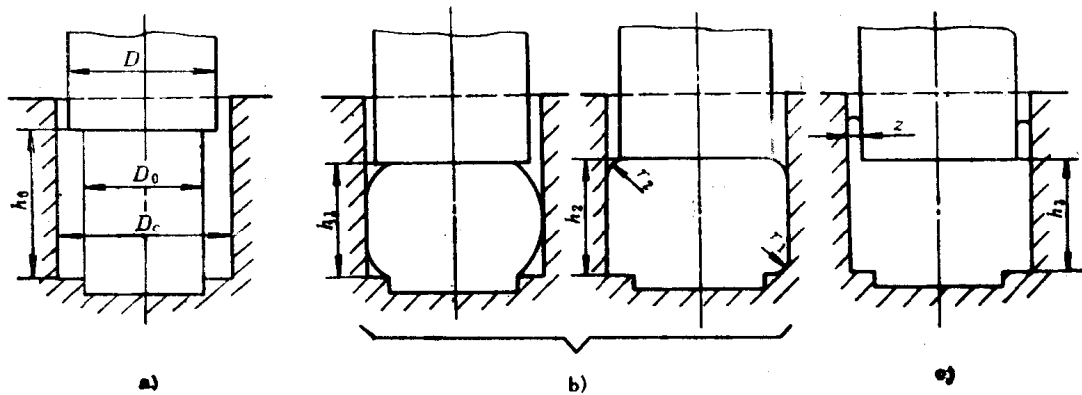


图2-6 闭式锻粗时充满模膛的三个阶段

a) 第一阶段 b) 第二阶段 c) 第三阶段

(1) 开式锻粗阶段（图2-6a） 开式锻粗即为自由锻粗，从坯料与冲头或上模膛表面接触开始到坯料金属与模膛（最宽处）的侧壁接触为止。与开式锻粗一样，闭式锻粗也分整体式闭式锻粗和局部闭式锻粗两类。前者都是以坯料外径定位，而后者都是以坯料的不变形部分定位。

(2) 充满角隙阶段（图2-6b） 即从毛坯的鼓形侧面与凹模侧壁接触开始，到整个侧表